

# Combustión supersónica y combustión en el espacio

Amable Liñán Martínez

Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica

**D**ebo empezar diciendo que mi actividad investigadora la inicié en el INTA, cuando entré como becario a trabajar en el grupo de combustión que se había montado en este Instituto. Este grupo tuvo su nacimiento como consecuencia de un reto: proporcionar los conocimientos científicos necesarios para desarrollar sistemas de propulsión más eficientes. En 1947, el entonces presidente del centro, Esteban Terradas, invitó a Theodore von Kármán a dar un ciclo de conferencias sobre Aerodinámica Supersónica. El profesor Theodore von Kármán fue el impulsor del desarrollo aeronáutico-científico de Estados Unidos, hasta tal punto que recibió la primera medalla nacional de Ciencia de EE.UU. en 1961, poco antes de morir.

El profesor Theodore von Kármán sentía la necesidad de disponer de la base científica para el desarrollo de los sistemas de propulsión, que venían demandados por las Fuerzas Aéreas americanas desde dos vertientes. Por una parte, el desarrollo de motores de reacción que se iban a utilizar para la propulsión de los aviones en régimen transónico y supersónico. Y, por otro lado, el desarrollo de los sistemas de propulsión para los misiles, especialmente los misiles balísticos, que desgraciadamente eran solicitados ante la necesidad de transportar bombas atómicas y, posteriormente, de hidrógeno.

Estas necesidades de desarrollo aeronáutico de los sistemas de propulsión eran paralelas a lo que había sido la demanda del desarrollo de la mecánica de fluidos, de la aerodinámica, de los materiales y de las estructuras, necesarias para la aviación. La aeronáutica militar, y más tarde la aeronáutica civil,

*Por su interés reproducimos la Conferencia Magistral del profesor Amable Liñán, Premio Príncipe de Asturias de Investigación, impartida con motivo de las Jornadas sobre "Tecnología y Programas Espaciales", organizadas por el INTA y el CEM el pasado mes de octubre*

había sido el motor de ese desarrollo científico, provocando efectos secundarios que arrastraban a toda la industria.

Cuando Theodore von Kármán examinó los procesos de combustión echó de menos la base científica, necesariamente interdisciplinar, que deberá incluir la mecánica de fluidos. La combustión, hasta entonces, se había examinado fundamentalmente desde el punto de vista químico, y sintió la necesidad de aportar los conocimientos de la mecánica de fluidos al examen de estos procesos de combustión, porque en definitiva la combustión es una reacción típica entre el oxígeno del aire y los combustibles, y éstos han de ser mezclados íntimamente antes de que la reacción se produzca.

Como decía, von Kármán se embarcó en la tarea de desarrollar la teoría de la combustión, apoyándose en la mecánica de fluidos, y recabó la ayuda, en España, de Gregorio Millán, entonces investigador en el INTA y profesor en la

*La aeronáutica militar,  
y más tarde la aeronáutica  
civil, había sido  
el motor de ese desarrollo  
científico, provocando  
efectos secundarios  
que arrastraban  
a toda la industria*

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos. Gregorio Millán inició esa actividad investigadora en nuestro país y a él se incorporaron posteriormente otros investiga-

dores, entre los que se contaban: Carlos Sánchez Tarifa, Ignacio Da Riva, Pedro Pérez Notario, García Moreno, etcétera.

Este esfuerzo investigador en sus primeros años iba dirigido a entender los problemas básicos de los procesos de combustión y estuvo subvencionado, desde sus orígenes, evidentemente por el INTA, pero también por la Oficina de Investigación Científica de las FF.AA. americanas. Esta Oficina creó una rama en Europa, por sugerencia de von Kármán, precisamente para atender a estos problemas y, a la vez, ocuparse también de buscar el apoyo de investigadores europeos a los problemas científicos del desarrollo de la combustión.

## Conocimientos básicos

Así pues, en los primeros años el esfuerzo fue dirigido al desarrollo de los conocimientos básicos de la combustión, pero, poco a poco, fuimos presionados a tender a los problemas asociados al desarrollo de sistemas específicos y en particular, ya a mediados de los años sesenta, iniciamos en el INTA un estudio de los problemas de la combustión supersónica. Para la propulsión de los aviones se utilizan motores de reacción, que consiguen la compresión necesaria para una combustión eficiente, utilizando compresores movidos por turbinas. Para velocidades más altas de vuelo se puede eliminar el compresor, al aprovechar sobrecompresión asociada a la deceleración de la corriente de aire relativa al avión. Es imprescindible reducir a

velocidades subsónicas la corriente de aire que llega a la cámara de combustión, para que la mezcla con el combustible sea posible. Esa deceleración implica un aumento de presión y entonces un aumento de temperatura, y ese incremento de presión es el suficiente, en los estatoreactores, para hacer la combustión y el rendimiento de la combustión eficaz a velocidades de vuelo moderadamente altas, sin necesidad de un compresor.

El estatoreactor de combustión subsónica funciona hasta números de Mach de vuelo del orden de 5 aproximadamente, y no se puede prolongar a velocidades de vuelo más altas porque -como decía-, en el proceso de deceleración de la corriente de aire que viene hacia el motor, se produce un incremento de temperatura. Este incremento de temperatura ha de sumarse al incremento de temperatura producido por la combustión y los problemas de materiales subsiguientes hacen imposible el uso de los estatoreactores de combustión subsónica a números de Mach más elevados.

Los procesos de combustión a velocidad subsónica eran bien conocidos en ese momento desde el punto de vista tecnológico. En cierto modo se apoyan en la propagación de llamas por la conducción del calor a velocidades relativamente bajas, y sólo a velocidades subsónicas era fácil la mezcla y la combustión. El objetivo es pasar a hacer la combustión supersónica, es decir, mezclar el combustible con el aire ambiente que viene hacia el avión sin decelerar éste apenas, y producir la mezcla y la reacción química dentro de la cámara de combustión, sin necesidad de esa deceleración adicional para evitar la generación de temperaturas demasiado altas que condujese a problemas de materiales.

Es lógico el deseo de pasar de números de Mach superiores a 4, utilizando el aire del ambiente para la combustión, si tenemos en cuenta que para los misiles intercontinentales y para los lanzadores los números de Mach de vuelo van a ser muy superiores; si no se encontraba la solución de la combustión supersónica, era inviable el re-



Un momento de la conferencia.

coger el oxígeno del aire ambiente para la propulsión, y esto conlleva la necesidad de transportar desde el suelo el oxígeno necesario para la combustión. Si se piensa en un combustible como el hidrógeno, por ejemplo, eso implica que por cada kilo de hidrógeno hay que llevar 8 kilos de oxígeno. Por esta razón, para llevar al espacio una carga de pago de 25 toneladas es necesario arrancar del suelo con 2.000 toneladas, esencialmente de oxígeno; o dicho de otra forma, el oxígeno se lleva una proporción muy alta de ese peso.

Si uno intenta desarrollar lanzadores al espacio que aprovechen el aire ambiente hasta números de Mach de 18 o 20, ya próximos a los necesarios para la satelización, entonces es imprescindible resolver ese problema de mezclar y quemar en el tiempo necesario, dentro de

la cámara de combustión, el combustible con el oxígeno. En los años sesenta, Estados Unidos lanzó un programa de combustión supersónica y en ese programa participamos modestamente nosotros.

Debo decir que nuestra participación en programas de combustión supersónica siempre ha tenido aspectos incómodos, porque uno se ve inmerso en un programa que está considerado como secreto en su mayor parte. Es decir, que uno actúa como investigador dentro del núcleo duro de la investigación y, por otro lado, el esfuerzo investigador de EE.UU., al menos en los elementos más serios, estaba clasificado, motivo por el cual uno participaba en ese esfuerzo casi como un observador.

### Cinética de las reacciones

Quiero indicar un par de problemas o de aspectos que hacen difícil el análisis de la combustión supersónica. En primer lugar hay problemas de la cinética de las reacciones. La reacción química tiene que ocurrir en el tiempo corto de paso de la mezcla combustible en la cámara de combustión del avión. De manera que hay un problema de tiempo químico. Ese problema de la cinética química se resuelve en parte por el mismo mecanismo de la combustión supersónica, si uno decelera lo suficiente -no demasiado- la velocidad de la

---

*La combustión es una  
reacción típica  
entre el oxígeno del aire  
y los combustibles,  
y éstos han de ser  
mezclados íntimamente  
antes de que la  
reacción se produzca*

---

corriente respecto al avión, eso implica un aumento de la temperatura y al aumentar la temperatura aumenta rapidísimamente la velocidad de reacción. Cuando esta temperatura de la mezcla es suficientemente alta ya las reacciones ocurren en los tiempos cortos, digamos del orden de los 10 microsegundos, necesarios para la combustión en la cámara de combustión. Las temperaturas necesarias, del orden de 1.200 K, se pueden alcanzar por compresión dinámica para números de Mach de vuelo superiores a 6.

### Reacciones hidrógeno-oxígeno

De manera que nuestra tarea era, en parte, analizar la cinética de esas reacciones hidrógeno-oxígeno porque, en definitiva, se iba a utilizar el hidrógeno como combustible; por ser uno de los combustibles más efectivos y, sobre todo, con cinética más rápida y para obviar, además, los problemas de la atomización de los líquidos y de la vaporización posterior de los mismos. Es decir, que nuestro esfuerzo iba dedicado a entender cómo la cinética química de las reacciones hidrógeno-oxígeno afectaba al proceso de mezcla y cómo éste podía evolucionar desde una situación dominada por la cinética hasta una situación dominada por el proceso de mezcla.

Pronto descubrimos que la dificultad de la combustión supersónica no estaba en la cinética química, sino en el proceso de mezcla. Ese descubrimiento nos impulsó a intentar establecer, en la Escuela de Ingenieros Aeronáuticos, una instalación experimental para analizar el proceso de mezcla. En aquel momento, nosotros creíamos que las dificultades estaban asociadas al hecho de que el combustible que inyectábamos era el hidrógeno, que tenía un peso molecular muy pequeño frente al oxígeno, y que esa disparidad del peso molecular era la causa de la poca eficacia del proceso de mezcla que es imprescindible para la combustión.

Así pues Ignacio Da Riva y yo iniciamos el montaje de una instalación experimental. En esa instalación íbamos a observar la mez-

cla de nitrógeno y helio. Debo decir que nos encontramos con toda clase de dificultades. Intentamos resolver el problema de recuperar el helio para reducir los gastos de operación de la instalación y ahí nos encontramos con tantas dificultades que abandonamos el proyecto. Sin embargo, enviamos a uno de nuestros estudiantes ya ingenieros, al Instituto Tecnológico de California, donde participaron en un proyecto análogo dedicado a la comprensión de los fenómenos asociados a las dificultades de la mezcla en la corriente supersónica.

El problema de la mezcla es que cuando uno inyecta un combustible gaseoso en una corriente de oxígeno el flujo es turbulento. Y debe ser turbulento porque la reacción química, cuando la cinética es suficientemente rápida porque las temperaturas son altas, está controlada por el proceso de mezcla. A las velocidades altas, o altos números de Reynolds, de la cámara de combustión las capas de mezcla, que son también capas de torbellinos, son inestables; el flujo es turbulento y esto hace eficaz la mezcla imprescindible para la combustión.

Sin embargo, aunque con flujo supersónico uno observaba una mezcla aparentemente eficaz (esto es, cuando se examinaba con sondas cómo variaba la concentración desde el núcleo del chorro de combustible al aire ambiente, se observaba una variación gradual de esa concentración de combustible y de aire, característica de una mezcla aparente macroscópica) resulta que no había combustión, a pesar de tener las temperaturas necesarias para la combustión supersónica; había mezcla aparente y no había combustión. No se podía

---

*Pronto descubrimos que la dificultad de la combustión supersónica no estaba en la cinética química, sino en el proceso de mezcla*

---

descubrir la dificultad mientras se estuvieran utilizando técnicas convencionales de observación. La razón está en que los torbellinos que aparecen tienen tiempos característicos de vida, del orden del milisegundo y los sistemas de observación, lo mismo que los sistemas de medida convencionales sólo proporcionan los valores medios. Cuando se hizo la experimentación con helio y nitrógeno, la diferencia de densidades era tan grande que fue posible la visualización de los torbellinos responsables de la mezcla sin necesidad de métodos de visualización artificiales, aprovechando las diferencias del índice de refracción de la luz. Podían, pues, observarse esas estructuras y fotografiarlas con un número de fotografías muy alto, del orden de 8.000 fotos por segundo, una cadencia muy superior a la de las observaciones previas.

### Fenómenos de la turbulencia

Tras estas observaciones, se descubrió algo que ha sido una revolución en nuestra comprensión de los fenómenos de la turbulencia. Lo que se vio es cómo evoluciona esa capa de torbellinos que se genera cuando hay un chorro de combustible en el aire, capa de torbellinos que es inestable, como bien se sabía antes. Pero lo que se observó es que los torbellinos se concentran en torbellinos anulares discretos, que aumentan de tamaño por apareamiento de los mismos. Es decir, hay un proceso de aumento de la escala de esos torbellinos por apareamiento de los vecinos que da lugar a torbellinos cada vez más grandes, cuando nos alejamos del inyector. De modo que había un mecanismo de generación de escalas grandes, de torbellinos grandes, responsable del crecimiento de la capa de mezcla. Estos torbellinos proporcionan el movimiento circulatorio que ingiere el aire en el chorro y lleva al combustible hacia los límites del chorro.

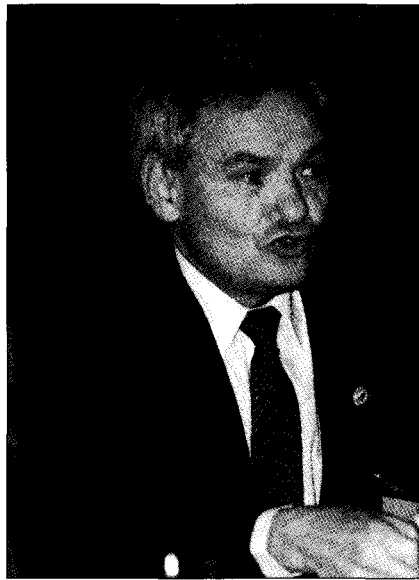
Estas grandes estructuras coherentes que se encontraron en estos procesos de mezcla turbulenta fueron el primer orden observado en el caos que representan los flujos turbulentos. En flujos subsónicos

estos torbellinos grandes están sujetos a inestabilidades que generan torbellinos más y más pequeños, hasta la llamada escala de Kolmogorov; esto es, hay una cascada inversa de generación de torbellinos grandes, por apareamiento, y una cascada directa de generación de torbellinos pequeños. Sin embargo, en régimen supersónico la radiación acústica generada por estos torbellinos atenúa el crecimiento de estas estructuras grandes y los mecanismos de generación de torbellinos pequeños por inestabilidades tridimensionales. Por ello en flujo supersónico había mezcla macroscópica generada por los torbellinos grandes, pero no había la mezcla microscópica, asociada a los torbellinos pequeños. Las dificultades de encontrar solución a este problema de mezcla es lo que retuvo el desarrollo de la combustión supersónica durante muchos años. Sólo recientemente se ha vuelto a replantear el problema, aprovechando todos los avances que hay en técnicas de diagnosis y en técnicas de observación para buscar de nuevo la solución del problema de la combustión supersónica.

Recientemente se realizó con éxito una experiencia de combustión eficaz en Rusia. En EE. UU. no se sabe si se ha hecho o no. Lo que sí es cierto es que hay un programa revitalizado para la combustión supersónica.

Nosotros en la Escuela de Ingenieros Aeronáuticos, y algunos de nuestros ingenieros aeronáuticos en Estados Unidos, hemos participado muy activamente en el esfuerzo investigador dedicado a la comprensión de estas estructuras coherentes. Esta comprensión puede aprovecharse con la idea de controlar estas estructuras para hacer la combustión más eficaz y también en sistemas de combustión subsónica. Este ha sido uno de los subproductos de los programas de investigación espaciales.

También hemos estado ligados a la combustión en el espacio en otros aspectos. Tenemos que agradecer a la Agencia Europea del Espacio (ESA) -antiguamente la ESRO- el estímulo que con sus programas ha proporcionado a todos



Amable Liñán Martínez

aquellos grupos que se preocupan de la investigación. En 1970 la ESA se embarcó en un programa para el desarrollo de sistemas de control de actitud de satélites, utilizando propulsión y cohetes basados en la descomposición catalítica de la hidracina. El INTA participó eficazmente en ese programa durante varios años.

En la combustión catalítica de la hidracina, esto es  $N_2H_4$ , esta se hace a través de un lecho poroso, formado por partículas de óxidos de aluminio, en el que aparecen incrustaciones de iridio depositado en las caras internas de esas partículas porosas. La hidracina fluye a través de los intersticios de las partículas, entra por capilaridad hacia el interior de las partículas porosas, se produce allí la vaporización y la descomposición con productos gaseosos en forma de amoníaco, hidrógeno y nitrógeno a temperaturas del orden de los 1.200K. Estos gases generados por descomposición catalítica de

la hidracina, o en otros sistemas por descomposición térmica, son los que se utilizan para la propulsión.

La ventaja de la descomposición catalítica de la hidracina es que puede hacerse la ignición a temperatura ambiente, gracias a que es una reacción catalítica precisamente. Por ello es posible utilizar estos propulsores de una forma intermitente para generar los pulsos necesarios para control de actitud de los satélites. Todos los problemas asociados al desarrollo de estos reactores catalíticos aparecen en la industria química en otras áreas muy distintas, y de algún modo es indicio de cómo la investigación promovida por el desarrollo espacial tiene aplicaciones después en otras áreas.

#### Estudios de combustión en el espacio

Y para terminar, quiero decir que estamos también embarcados en estudios de combustión en el espacio. Esto es, de los problemas de ignición y propagación de llamas en condiciones de microgravedad. Estos estudios son necesarios porque los datos utilizados para determinar los riesgos de incendios en instalaciones están muy ligados a experiencias hechas aquí, en el suelo, donde la convención natural ayuda a aliviar enormemente los problemas de riesgos de incendio. Esto es así porque cualquier fuente calorífica que genera calor, calienta el aire circundante y también produce gasificación de especies que pueden ser inflamables; la convención natural ayuda a eliminar, del foco donde se están produciendo estas especies, el calor y las sustancias inflamables y, en definitiva, disminuir la posibilidad de que se produzca ignición espontánea de la mezcla. Este mecanismo desaparece del espacio y ha obligado a establecer requerimientos extraordinariamente rígidos a la hora de hacer experimentación en el espacio. Lo que se busca de algún modo es entender cómo son estos mecanismos que pueden producir incendios y propagarlos en el espacio, para reducir esas normas a límites más razonables. □

*La ventaja de la descomposición catalítica de la hidracina es que puede hacerse la ignición a temperatura ambiente*